

# 基于电机余热回收的纯电动汽车热管理系统性能改善

汪毛毛, 王伟民, 张中亚, 徐人鹤, 石琳, 彭林杰, 瞿爱敬, 施睿

(东风汽车集团有限公司技术中心, 武汉, 430058)

**摘要:** 本研究在某款纯电动汽车原有热管理系统基础上增加电机余热回收功能, 并进行了精细化控制。在满足电池、电驱动和乘员舱等子系统热管理需求的前提下, 可以使整车低温续航里程相对于原车低温里程提高约 7%。

**关键词:** 整车热管理; 控制系统联合仿真; 电机余热回收

## Improvement of Thermal Management System for a Battery Electric Vehicle based on Motor Waste Heat Recovery

Wang Maomao, Wang Weimin, Zhang Zhongya, Xu Renhe, Shi Lin, Peng Linjie, Qu Aijing, Shi Rui

Dongfeng Motor Corporation Technical Center, Hubei, Wuhan, 430058

**Abstract:** In this study, the function of motor waste heat recovery is added on the base of the original thermal management system of a pure electric vehicle, and fine control is carried out. On the premise of meeting the thermal management requirements of subsystems such as battery, electric driving and passenger compartment, the low-temperature range of the whole vehicle can be increased by about 7% compared with that of the original vehicle.

**Keywords:** Whole vehicle thermal management; Joint simulation of control system; Motor waste heat recovery

## 1. 前言

随着纯电动汽车越来越普及, 纯电动汽车在使用过程中的诸多问题也逐渐暴露出来。高低温环境下, 纯电动汽车续航里程衰减是当前用户的一大痛点。与传统燃油车相比, 纯电动汽车的主要动力总成(动力电池、电机、控制器、充电机等)发热量小, 工作温度范围小, 工作性能受温度影响大, 过高或过低的工作温度会影响电池的容量、使用寿命和电机的工作效率。因此电池低温环境下需要合理加热, 高温环境下需要对电池适当降温, 以保证电池始终处于合理温度范围内<sup>[1]</sup>。

目前, 纯电动汽车主流热管理系统采用 PTC 水加热器对乘员舱及电池包进行加热, 该系统可以有效的满足电池包及乘员舱的热管理需求。但是由于 PTC 耗能较高, 严重影响在低温环境下的纯电动汽车续航里程。因此, 非常有必要对纯电动汽车整车热管理系统进行精细化管理。

本文首先对原车热管理系统进行了深入的仿真研究, 并基于原车现状提出新的热管理系统回路及新的控制策略。通过搭建原车及新方案的整车热管理仿真模型<sup>[2]</sup>, 对两种方案的整车能量使用情况进行详细研究, 对原系统在低温环境下的高耗能部件进行控制策略的仿真优化, 提出相关改善方案。最终, 通过整车控制模型与整车热管理模型联合仿真, 对改善后的整车热管理系统进行精细化能量管理<sup>[3]</sup>。

## 2. 基于电机余热回收的整车热管理系统简介

本文研究车型原热管理系统在低温条件下加热系统主要功能为: 采用 PTC 对乘员舱进行加热, 行车工况电池包系统无加热功能。该方案主要优点为: 将电池能量直接转化为用户所要求实现的目标, 满足用户对行车及乘员舱加热的需求, 控制系统及热管理回路相对简单, 容易实现。但是, 由于并未考虑行车工况电池包系统的温度需求, 对电池包使用寿命存在一定影响, 同时由于并未充分考虑电动车电机余热回收及电池包本体电容量衰减等问题, 其在低温环境下续航里程衰减较为严重。基于以上问题, 本文在原车热管理回路基础上增加部分管路及控制水阀, 实现电机余热回收、电池包系统行车加热等功能, 同时对控制系统进行优化, 实现对乘员舱及电池较为经济的加热, 如图 1。

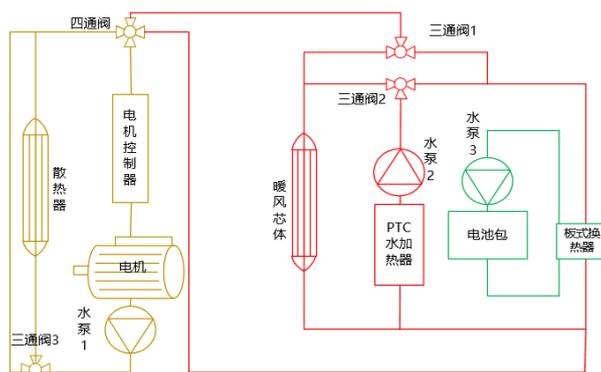


图 1 带余热回收的整车热管理冷却液回路

### 3. 整车热管理系统仿真

本文的研究目的是通过仿真手段预测整车在高低温环境下的续航里程，通过优化回路及控制策略实现以较低能耗满足高低温工况下整车热负荷需求，从而延长高低温工况下整车续航里程。本文仿真模型主要包含两方面内容：整车热管理系统热、电、机耦合仿真模型，整车热管理系统控制策略模型。

通过 GT-Suite 搭建整车热管理系统仿真模型，包含动力电池包、电驱动系统、热管理系统、乘员舱及外部环境。其中电池包通过拟三维方法搭建电池包热、电耦合仿真模型，模拟实车电池包的真实充放电情况及电池包温度分布情况。电驱动系统重点描述电机系统动力特性、产热特性及制动能量回收，模拟电驱动系统的实际行车工况。热管理系统重点描述空调制冷剂回路及整车水热管理回路的热量产生、交换及损失，是本文研究的最核心的系统。乘员舱系统简单描述了整车乘员舱在不同环境及需求下的热负荷。

通过 Matlab-Simulink 搭建整车热管理控制系统及相关控制策略。整车热管理控制系统描述了在各种环境下热管理系统工作的模式及相关零部件的动作，并且为了实现与真实行车工况一致，增加了热管理系统各个核心零部件的响应过程及在工作过程中可能触发的所有保护策略。研究发现，核心零部件的响应过程对整车热管理系统仿真结果的精度有较大影响。

利用 GT-suit 与 Simulink 联合仿真功能，将整车仿真模型与控制模型进行耦合，实现实车上的真实控制策略，从而对实车工况进行更加精确的研究。同时，对于改善热管理方案，可以通过控制系统模型与整车仿真模型联合仿真，对整车控制策略进行研究，通过对不同控制策略模型及控制参数的研究，实现整车热管理系统最优控制，完成整车热管理控制系统开发软件在环仿真工作。

#### 3.1 电池包仿真模型

动力电池包作为纯电动汽车的能量核心。动力电池整包的主要构成可以分为电池模组、水冷板、线束、BMS、电池包外壳等，通过适当简化，仿真只保留对整包热性能影响较大的部分，在此基础上即可通过 GT-SPACECLAIM 完成电池包基础模型搭建。

电池包可以分为 4 个部分：

- 1) 电池模组：考虑电池包的充放电特性，构建电池包模组模型，由于各模组结构相同，为便于建模，此处可以建立一个典型模组模型，然后复用；
- 2) 水冷板：电池包水冷板铺设于各模组下方，结构形式为典型口琴管，建模过程中用等效质量和流通面积等代替；
- 3) 电路模型：该电池包模组的串并联关系在电路模型中集中描述；
- 4) 电池壳体：主要用于描述电池壳体、结构和非发热件的热容和传热过程，以及电池包与环境的对流换热。

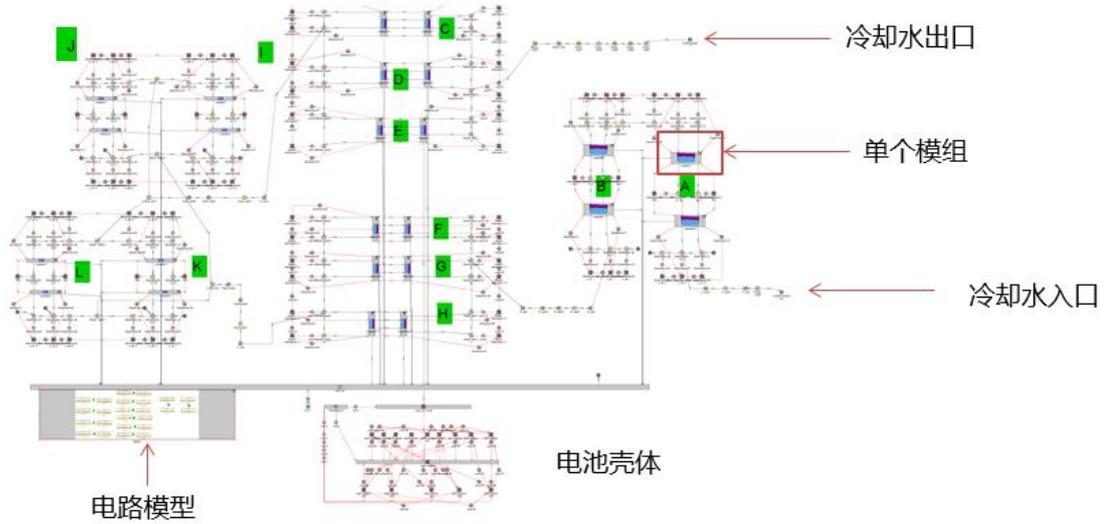


图 2 电池包拟三维仿真模型

电池包主要质量构成和热源为 24 个模组，各模组的拟三维模型如图 2 所示。各模组的主要构成包括电芯、导热硅胶、水冷板、冷却液、模组盖板、导热硅胶、绝缘胶等，建模过程中考虑了各组成部分之间的热传导和对流换热，以及热容、导热系数等主要物性参数，其中电芯由于其自身的结构特点，导热系数体现出典型的各项异性。各电芯的发热模型采用前文所述的 RC 等效电路模型。

### 3.2 空调系统系统仿真模型

空调系统主要包含制冷系统和制热系统，如图 3。其中制冷系统包含压缩机、冷凝器、膨胀阀、蒸发器、相关管路。传统 PTC 型热管理纯电动汽车制热系统主要包括 PTC 及相关管路。

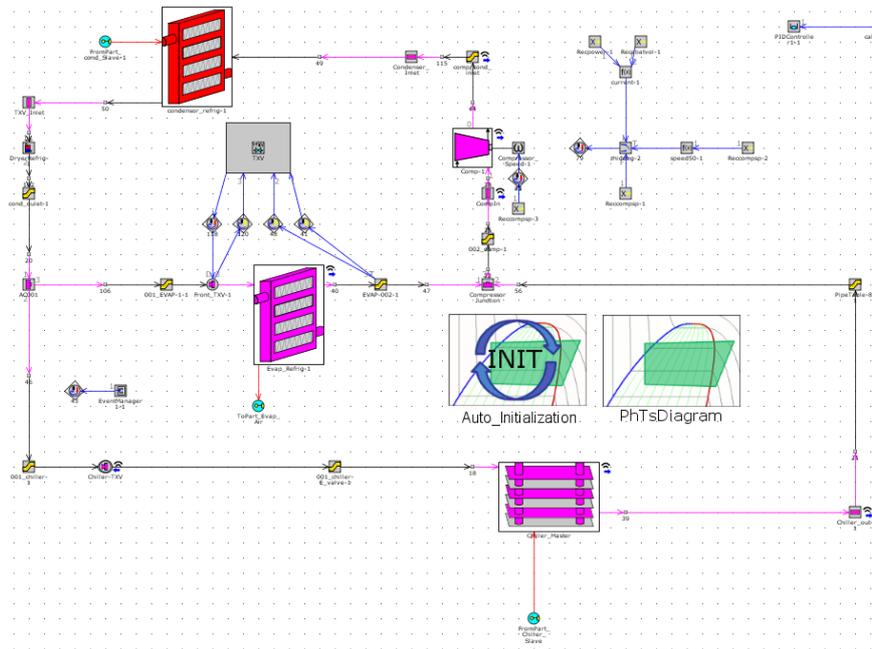


图 3 空调冷却系统仿真模型

### 3.3 电驱动冷却系统仿真模型

电驱动系统包括电驱动回路中的电机及冷却水回路，如图 4。电机通过 GT-suite 中 Motor 模块建

立电机特性模型，主要包括电机效率  $\eta$ 、扭矩特性等。其中，需求驱动制动功率是电机模型运行的输入，它是由由制动能量回收策略及整车行驶工况、整车参数决定的。电机模型可以输出电机的发热量。

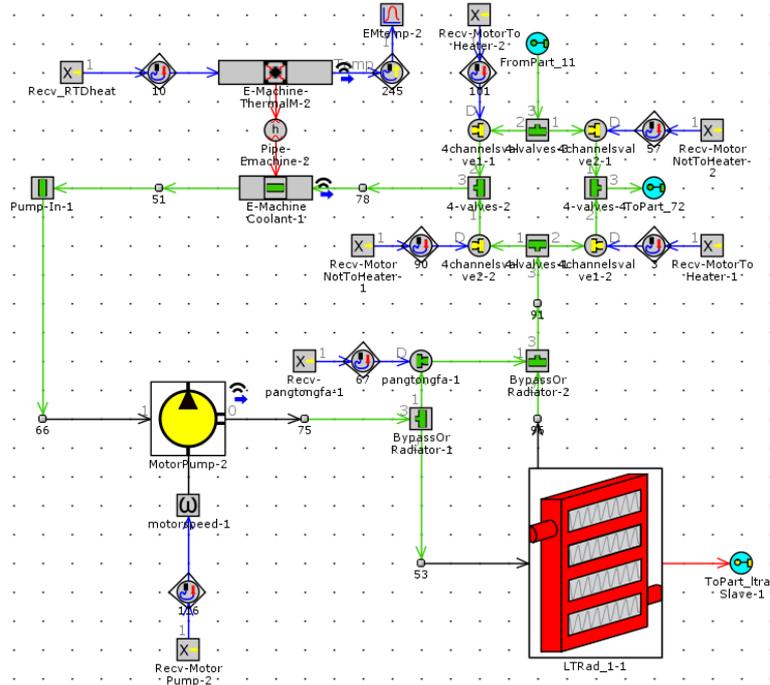


图 4 电驱动冷却系统仿真模型

### 3.4 乘员舱系统仿真模型

乘员舱系统主要包括乘员舱箱体，乘员舱对外换热模型，乘员舱与空调系统换热模型如图 5。

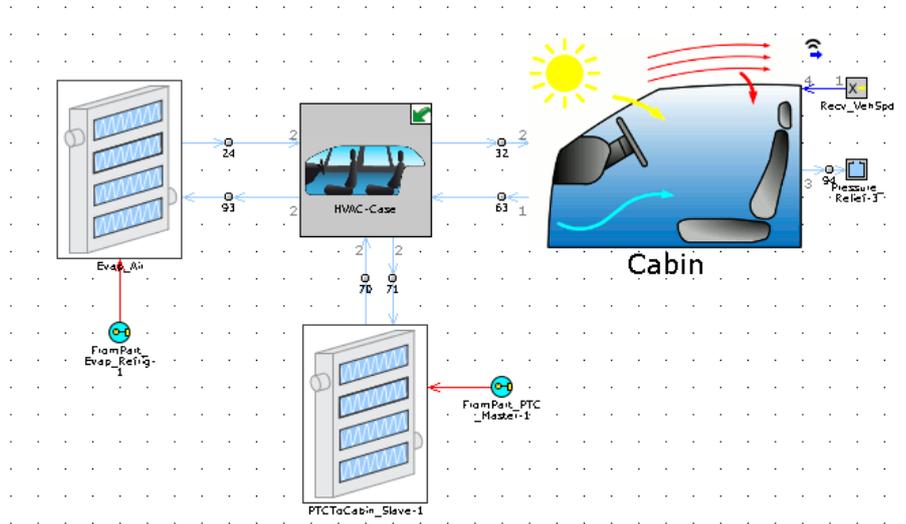


图 5 乘员舱系统仿真模型

### 3.5 整车行驶系统仿真模型

整车行驶模块包含电池、电机、传动轴、差速器、轮胎、车身、大气环境、电机控制模块、制动能量回收模块。其中传动轴、差速器、轮胎、车身构成了整车传动系统。传动轴通过 Alex 模块定义相关参数，差速器通过 differential 模块定义传动比、传动效率等参数，刹车系统通过 brake 模块定义刹车力，大气环境通过 Ambient 模块定义温度、光照、湿度等条件。图 6 为整车车身及传动系统。



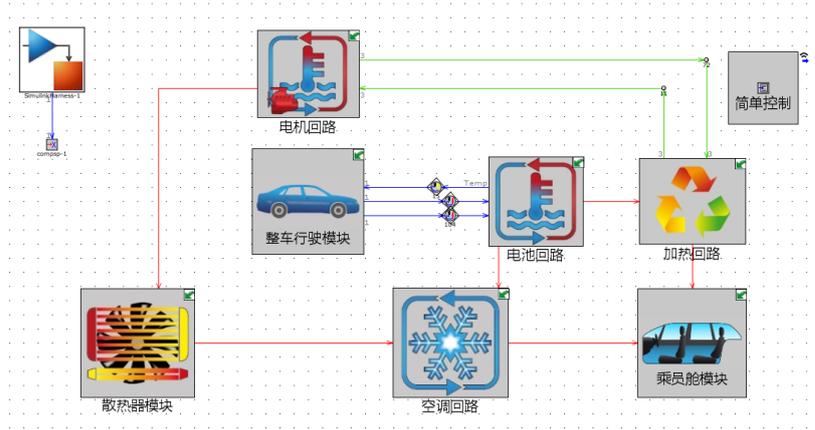


图 8 整车行驶工况仿真模型

### 3.7 热管理系统控制系统建模

在整车行驶工况下，随着车辆的运行，整车状态在时刻发生着变化，整车热管理系统随着车辆状态的变化在不断调整热管理零部件的运行状态，从而时刻满足整车热管理需求。因此有必要搭建整车真实热管理控制策略模型，进行整车热管理系统的仿真。

整车热管理控制策略可以主要分为三块。热管理控制系统根据实车状态信号，判断车辆加热/制冷情况，如图 9。

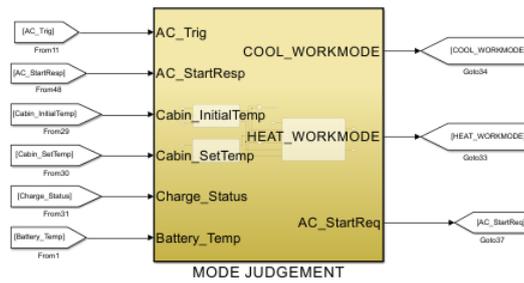


图 9 模式判断模块

通过模式判断整车进入制冷模式后，控制系统根据实车状态及目标状态，控制制冷系统相关零部件工作，如图 10。

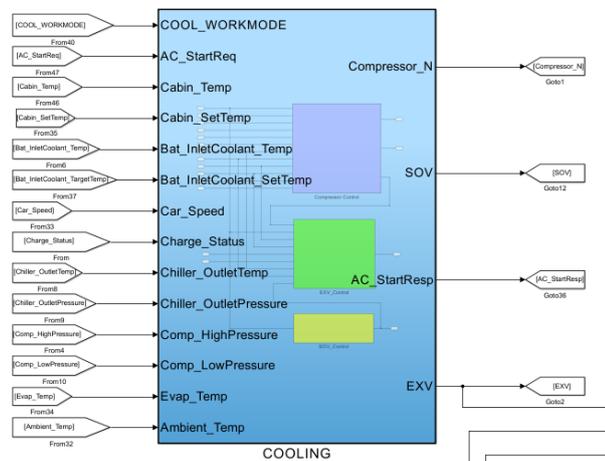


图 10 制冷系统模块

通过模式判断整车进入制热式后，控制系统根据实车状态及目标状态，控制制热系统相关零部件工作，如图 11。

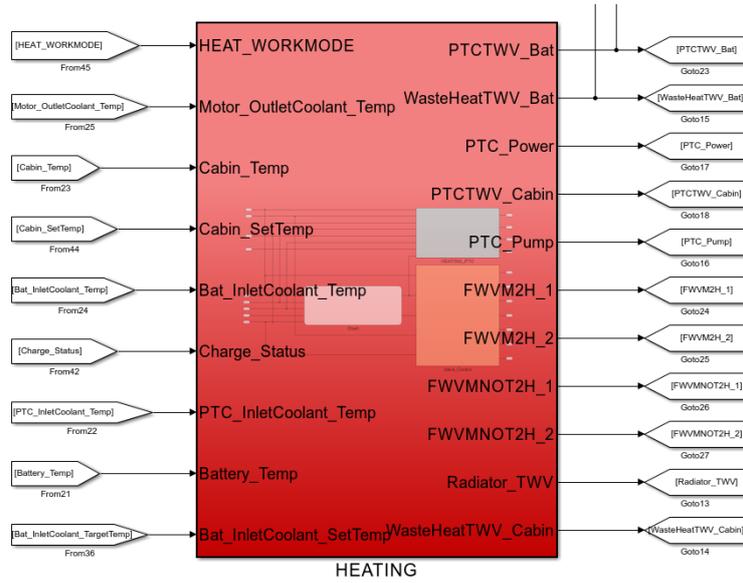


图 11 制热系统模块

### 3.8 整车热管理系统与控制策略耦合仿真

通过将热管理仿真模型与控制策略模型进行耦合，如图 12，对整车高低温续航里程进行仿真分析和预测。

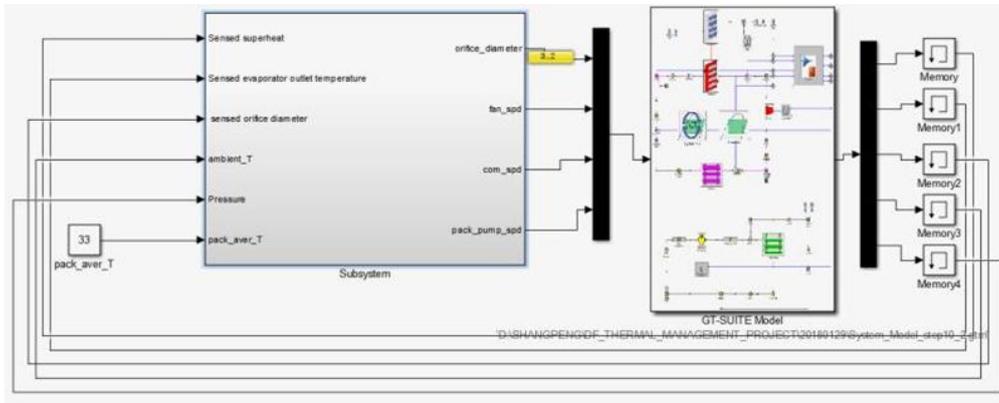


图 12 整车热管仿真模型与控制策略耦合仿真

### 3.9 原车整车热管理系统的仿真和试验对标

本节通过以上搭建的完整的整车热管理系统的一维模型，使用中国工况 CLTC-p 工况速度谱，通过仿真试验对标，验证了实车行驶工况下模型的仿真精度。仿真工况依据 EV-test 2019 版规范，进行低温续航里程的仿真，仿真条件如表 1。

表 1 EV-test 高低温续航里程工况

	环境温度	车辆浸车	充放电情况	截止条件
低温续航	-7℃	车辆充电至 100% SOC, 浸车 12-16h	按照 CLTC-p 工况进行续航里程测试	放电至电池输出功率无法满足 CLTC-p 循环要求

该试验工况的环境温度是-7℃，整车在-7℃环境下浸车 12h 至 0℃，初始 SOC99%，整车空调采

用自动空调外循环，乘员舱温度设定为 21℃。实车行驶速度曲线采用 CLTC 工况，如图 13。

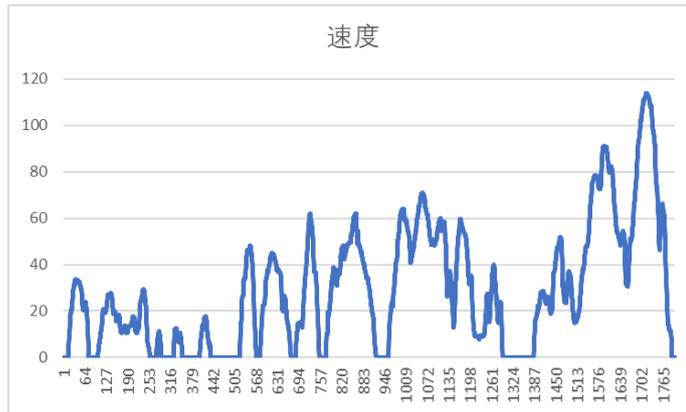


图 13 CLTC 速度曲线

针对原车热管理系统，实车行驶工况下的电池温度仿真与试验对比如图 14，乘员舱温度仿真与试验对比如图 15。

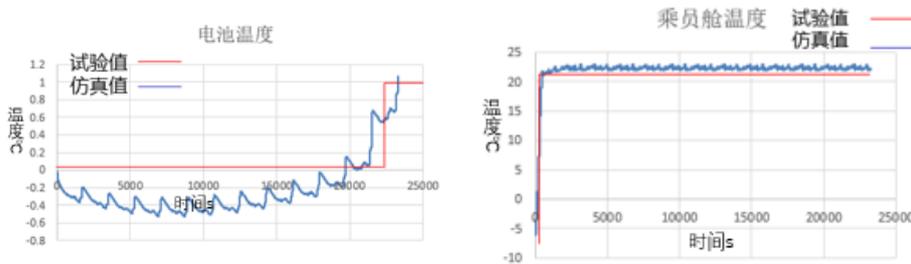


图 14 电池温度仿真与实际对比

图 15 乘员舱温度仿真与实际对比

低温工况下整车续航里程仿真结果与试验续航里程精度为 97.9%，如图 16。通过对仿真结果研究表明，在-7℃环境下，按照 CLTC 行驶，电驱动系统的功率受温度影响很小，续航里程衰减主要受空调 PTC 电耗、电池能量衰减等方面的影响。其中，在低温行驶过程中，空调 PTC 是除电驱动系统以外最大的耗能部件。通过仿真发现，PTC 实际平均功耗为 2Kw。

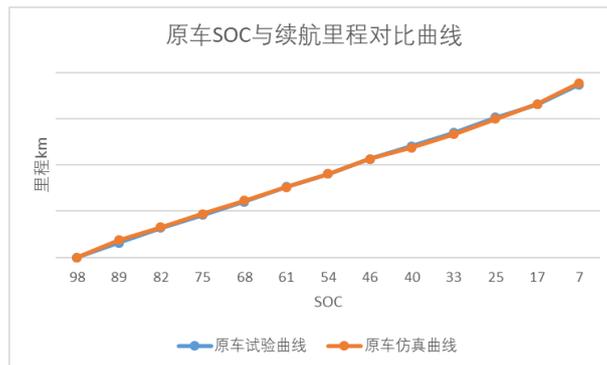


图 16 原车低温续航里程仿真与试验对比

#### 4. 电机余热回收对低温续驶里程的改善效果

通过改进的整车热管理系统仿真模型与控制系统模型进行耦合仿真，发现电机余热对电池包进行加热，有利于续驶里程的提升。联合仿真过程中，通过调整控制系统关键控制参数，优化电机余热回收利用效果和控制稳定性。

经过多轮仿真及优化，最终实现低温行驶工况下，整车低温续航里程提高 9%，如图 17，实际上试验结果提升了 7.5%。

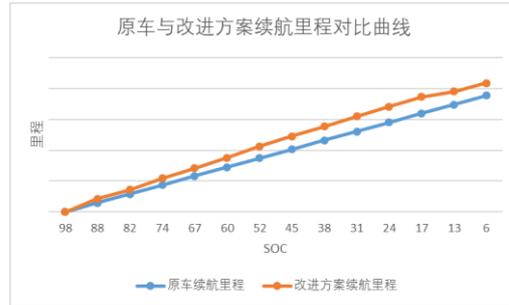


图 17 原车与改进方案续航里程对比

在利用电机余热过程中，电机余热回收功率如图 18，电机余热回收平均功率为 0.4Kw。

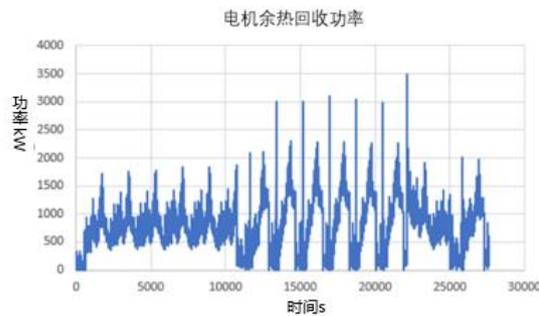


图 18 电机余热回收等效功率

通过能耗分析，纯电动汽车在低温环境下，续航里程衰减主要受 PTC 等高压耗电部件、电池性能衰减等因素影响。利用电机余热，对电池包进行加热使电池包工作在较为合适的温度区间，可以有效恢复电池容量，减小电池内阻，经试验研究发现，行车工况下 15℃ 的电池包比 0℃ 的电池包能够多放出 7% SOC 的电量。基于本改进方案，电池包平均温度与原车电池包平均温度如图 19。

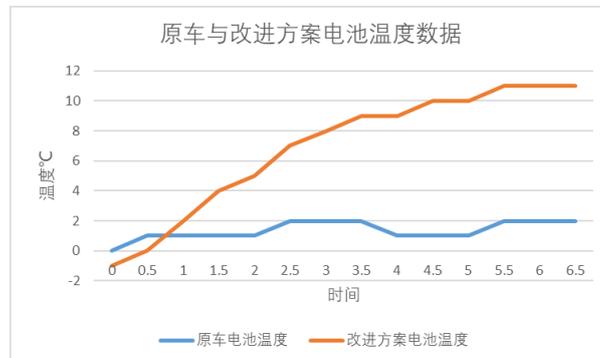


图 19 改进方案电池平均温度与原方案电池平均温度对比

## 5. 总结

本文搭建了基于电机余热回收的纯电动汽车整车热管理系统仿真模型，并建立了热管理系统控制策略 Simulink 模型，通过将两者耦合，实现按照热管理策略进行的整车高低温性能仿真，从而预测整车热管理系统性能。

通过基于电机余热回收的纯电动汽车整车热管理系统仿真和试验研究，发现整车能量的精细化管理对整车低温续航里程提升有显著作用。

- (1) 电机余热回收可以给电池包加热，恢复电池容量，有利于提升低温续航里程；
- (2) 通过利用控制系统与整车模型联合仿真，对于改善和优化最终整车性能具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 王芳、夏军等. 电动汽车动力电池系统设计与制造技术: 科学出版社: 180~180.
- [2] 徐人鹤, 王伟民, 李斌, 王小碧, 石琳, 余劲鹏, 汪毛毛, 纯电动汽车高低温快充仿真及试验验证, 2018 年 IDAJ 中国 CAE/CFD 技术大会论文集, 2018。
- [3] M. Auer, T. Kuthada, N. Widdecke, J. Wiedemann, Simulation of a Battery Electric Vehicle, IVK/FKFS University of Stuttgart, Oct. 2014.